祁连圆柏群落特征沿年降水量梯度的变化格局

王童犇[1]， 朱 芩[1]， 侯晓巍[2]， 郝家田[2]， 李智华[2]， 侯 琳[1,3]

（1. 西北农林科技大学林学院，陕西 杨凌 712100；2. 国家林业和草原局西北调查规划设计院，陕西 西安 710048；3. 陕西秦岭森林生态系统国家野外科学观测研究站，陕西 杨凌 712100）

摘 要：祁连圆柏（*Juniperus przewalskii*）群落是青海省的主要森林群落之一，在保持水土、涵养水源和维护生态平衡等方面起着关键作用。为了解祁连圆柏群落特征和祁连圆柏种群年龄结构对年降水量梯度的响应，以青海省祁连圆柏天然群落为研究对象，沿年降水量梯度布设群落样地，开展群落特征调查。结果表明：（1）该地区年降水量自西北向东南逐渐增加，随着年降水量增加，祁连圆柏群落灌木层、草本层优势种的重要值发生了显著变化（$P<0.05$）。（2）年降水量在169~377 mm之间时种群呈衰退型，年降水量为470 mm、530 mm时，种群分别呈稳定型、增长型。（3）林下植物α多样性指数在不同年降水量下差异显著（$P<0.05$）。随着年降水量增加，灌木层、草本层的Shannon-Wiener指数、Simpson指数和物种丰富度逐渐增大，且均在年降水量为530 mm时达到最大值。（4）随着年降水量增加，灌木层的β多样性指数呈"波动"变化，Cody和Sorensen指数在年降水量470~530 mm和281~377 mm时，分别达到峰值和谷值；草本层的β多样性指数先增加后降低，Cody和Sorensen指数在年降水量377~470 mm时分别达到峰值和谷值，两者之间β多样性最大，物种更替速率最快。年降水量对祁连圆柏种群年龄结构和群落特征有显著影响，在年降水量低于377 mm的林区，改造林地微地形、蓄集天然降水、防止牛羊危害，有利于天然更新。

关键词：年降水量梯度；祁连圆柏（*Juniperus przewalskii*）；群落特征；物种多样性；青海

植物群落是植物不断进行调节和适应所处的环境变化形成的集合体[1]，群落物种多样性反映了群落在组成、结构和功能等方面的相异性，揭示了外部环境条件与群落之间的相互关系[2]，群落物种多样性沿环境梯度的变化格局已成为生态学研究的热点之一[3]。有研究发现降水变化对荒漠植物群落多样性无显著影响[4-5]，也有研究发现降水格局对群落物种多样性、丰富度和均匀度影响显著[6-7]，植物群落特征对降水变化的响应仍存在争议。

青海省地处青藏高原腹地，受东亚季风、高原季风和西风带气候的影响，水资源分布不均匀，是全球同纬度最干旱的地区之一[8]。祁连圆柏（*Juniperus przewalskii*）因耐旱、耐瘠薄，成为该区主要成林树种之一，在维护生物多样性、水源涵养和水土保持等方面发挥重要作用。目前对祁连圆柏的研究主要集中在树木年轮气候学[9]、生理生态学[10]、育苗造林技术[11]和生物化学成分[12]等方面，而对祁连圆柏群落学特征的研究较少，且只集中在海拔[13]、坡向[14]等地形因子对群落物种多样性的影响。青海省自西北向东南有明显的天然降水梯度，降水格局的变化影响着植物群落的组成和结构，沿着年降水量梯度，祁连圆柏种群年龄结构如何变化，祁连圆柏群落物种多样性怎样变化。这些问题还未得到很好阐释。

在全球气候变化背景下，降水变化对森林生态系统的影响日益加剧，研究植物群落组成和物种多样性对年降水量梯度的响应对干旱地区天然植物群落的保护至关重要。因此本研究以青海省祁连圆柏天然群落为研究对象，沿年降水量梯度设置调查样地，探讨在天然降水变化下祁连圆柏群落特征的响应，以期为天然林保护和管理提供理论依据。

收稿日期：2021-05-16； **修订日期：**2021-07-09

基金项目：国家林业和草原局西北规划设计院项目（K403218362）；旱区生态水文与灾害防治国家林业局重点实验室项目"青海柏树生态系统有机碳空间特征研究（LC-2-12）"

作者简介：王童犇（1997-），女，硕士研究生，主要从事森林生态学研究. E-mail: wangtongben@nwafu.edu.cn

通讯作者：侯琳. E-mail: houlin_1969@nwsuaf.edu.cn

1 研究区域与方法

1.1 研究区概况

以青海省德令哈市古柏园、都兰县热水乡林场、兴海县河北林场、互助县北山林场和泽库县麦秀林场分布的祁连圆柏天然群落为研究对象，研究区属高原大陆性气候，年平均气温-2.5~7.9 ℃，年均降水量160~590 mm，降水量分布极不均匀，区域差异较大。祁连圆柏群落多分布于阳坡，乔木层以祁连圆柏为建群种，林下灌、草种类丰富，林内放牧、采伐等现象较严重。基于2010—2018年青海省的平均降水量数据，采用反距离加权插值法在ArcGIS软件中绘制出研究区的降水量等值线图，研究区的年均降水量由西北到东南总体上呈递增趋势（图1），表现为德令哈市（169 mm）<都兰县（281 mm）<兴海县（377 mm）<互助县（470 mm）<泽库县（530 mm）。

1.2 样地设置

2018年7月、2019年8月在5个调查地点分别选取祁连圆柏天然林分布较多的地段，选择林分密度、坡度、坡向等立地条件相似的样地92个（表1），

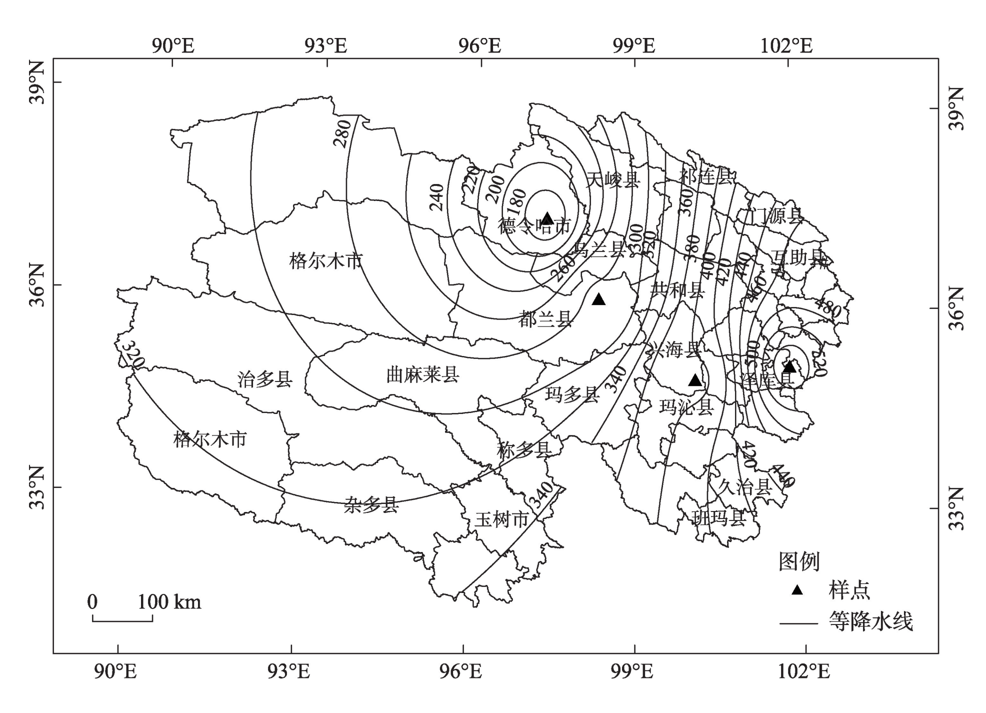


图1 研究区采样点位置示意图

Fig. 1 Location of research area and sampling point

表1 样地概况

Tab. 1 Information of sampling sites

样点	样地数	经纬度	海拔/m	坡度/(°)	坡向	林分密度/(株·hm^{-2})	龄组	胸径/cm	树高/m	林冠郁闭度
DLH	19	37°29′11″~37°29′25″N 97°19′40″~97°20′50″E	3641±13ab	30.50±1.46a	阳坡	523.75±19.15a	中龄林	33.4±1.6a	6.1±0.3bc	0.37±0.02c
DL	18	37°01′10″~37°02′34″N 98°39′45″~98°39′56″E	3744±45a	29.93±1.44a	阳坡	541.67±28.31a	中龄林	33.6±1.8a	5.5±0.4c	0.41±0.04c
XH	20	35°59′28″~36°16′40″N 98°06′30″~98°20′10″E	3157±143c	30.00±2.12a	阳坡	616.67±39.09a	中龄林	32.7±1.8a	10.1±0.5a	0.43±0.03bc
HZ	17	35°01′29″~35°04′20″N 100°07′23″~100°09′36″E	3529±74b	31.48±1.72a	阳坡	622.06±33.62a	中龄林	18.7±1.2b	7.2±0.2b	0.48±0.02b
ZK	18	35°11′52″~35°18′35″N 101°52′06″~101°57′41″E	3601±52ab	32.97±0.78a	阳坡	628.13±41,32a	中龄林	17.6±1.8b	6.4±0.8bc	0.56±0.03a

注：DLH表示德令哈市古柏园，DL表示都兰县热水乡林场，XH表示兴海县中铁林场，HZ表示互助县北山林场，ZK表示泽库县麦秀林场；相同植被层的不同小写字母表示年降水量梯度间差异显著（$P<0.05$），图中数据为平均值±标准误差。

样地面积为20 m×20 m。在每个样地内按照“对角线法”，设置5个灌木样方(5 m×5 m)，5个草本样方(1 m×1 m)，对样地内的乔木进行每木检尺，记录其种名、胸径、树高、冠幅和林分郁闭度等。灌、草样方调查并记录植物的种名、株数、高度、盖度等。

种群的年龄结构按径级结构划分[15]。幼苗，Ⅰ级：H(苗高)<30 cm；幼树，Ⅱ级：H(树高)≥30 cm且DBH(胸径)<5 cm；小树，Ⅲ级：DBH 5~15 cm；中树，Ⅳ级：DBH 15~25 cm；大树，Ⅴ级：DBH>25 cm。

1.3 数据处理与分析

(1) 物种重要值[16]：

重要值=(相对密度+相对频度+相对盖度)/3

(2) 物种多样性指数[17]：

物种丰富度指数S=样方物种数N

Shannon-Wiener多样性指数 $H' = -\sum_{i=1}^{s} P_i \ln P_i$

Simpson优势度指数 $D = 1 - \sum_{i=1}^{s} P_i^2$

Pielou均匀度指数 $J_{sw} = H' / \ln S$

式中：S为物种数；P_i为种i的相对重要值。

Sorensen相似性系数：$SI = \frac{2c}{a+b}$

Cody指数：$\beta_c = \frac{a+b-2c}{2}$

式中：a、b分别为相邻2样地各自的物种数；c为2样地之间的共有物种数。

用Excel 2019对调查数据进行统计整理，采用SPSS 24.0软件进行方差分析，使用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)评估不同年降水量梯度下物种多样性指数的差异，用Origin 2019软件完成作图。

2 结果与分析

2.1 年降水量梯度下群落物种组成及重要值

祁连圆柏群落内共有种子植物36科102属144种，其中裸子植物1科1属1种，单子叶植物6科14属17种，双子叶植物29科87属126种。根据群落各植被层的优势种(重要值>10)及其重要值(表2)可以看出：在不同年降水量下，乔木层均由祁连圆柏组成，其重要值最大，是群落的建群种。灌木层、草本层优势种的重要值随年降水量而变化，灌木层中，年降水量为169 mm时，金露梅(*Potentilla fruticosa*)为绝对优势种，其重要值为61.02；年降水量为281 mm时，鲜黄小檗(*Berberis diaphana*)为绝对优势种，其重要值为58.37；年降水量为377 mm时，长刺茶藨子(*Ribes alpestre*)、金露梅为优势种，其重要值之和为59.41；年降水量为470 mm时，金露梅、银露梅(*Potentilla glabra*)为优势种，其重要值之和为73.92；年降水量为530 mm时，金露梅、银露梅、拟小檗(*Berberis parapruinosa*)为优势种，其重要值之和为63.57。草本层中，年降水量为169 mm、281 mm、377 mm时，披针叶苔草(*Carex lanceolata*)、珠芽蓼(*Polygonum viviparum*)均为优势种，其重要值之和分别为42.78、50.52、48.94；年降水量为470 mm时，

表2 不同年降水量梯度下各植被层优势种的重要值

Tab. 2 Importance values of dominant species of various vegetable layers along different annual precipitation

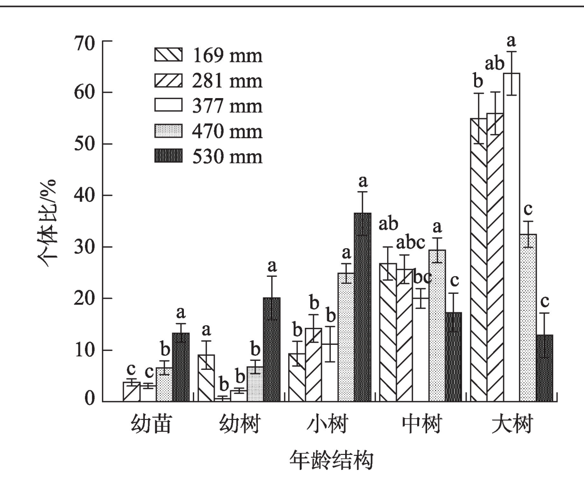
层次	种名	年降水量/mm				
		169	281	377	470	530
乔木层	祁连圆柏(*Juniperus przewalskii*)	100.00±0.00	100.00±0.00	100.00±0.00	100.00±0.00	100.00±0.00
灌木层	金露梅(*Potentilla fruticosa*)	61.02±1.64a	22.29±1.02b	39.41±2.21ab	32.12±1.89b	22.39±3.71b
	银露梅(*Potentilla glabra*)	18.29±1.83b	0.00±0.00	15.48±1.31b	41.79±1.63a	23.2±1.81b
	鲜黄小檗(*Berberis diaphana*)	16.14±1.39b	58.37±3.79a	4.01±0.38d	9.03±0.86c	7.27±2.67cd
	长刺茶藨子(*Ribes alpestre*)	0.00±0.00	0.00±0.00	20.00±1.34	0.00±0.00	0.00±0.00
	高山柳(*Salix cupularis*)	1.03±0.69c	16.67±1.57a	0.00±0.00	0.00±0.00	3.48±0.26b
	拟小檗(*Berberis parapruinosa*)	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	17.98±2.27
草本层	披针叶苔草(*Carex lanceolata*)	31.34±2.14a	30.39±1.36a	25.73±1.18a	27.64±3.04a	11.85±1.43a
	珠芽蓼(*Polygonum viviparum*)	11.44±2.82ab	20.13±2.22a	23.21±2.47a	6.16±1.64b	7.19±2.42b
	披碱草(*Elymus dahuricus*)	1.94±0.24b	0.75±0.13b	0.54±0.12b	0.00±0.00	15.1±0.87a
	乳白香青(*Anaphalis lactea*)	5.43±1.50b	10.65±0.78a	1.84±1.16bc	0.00±0.00	1.18±0.33c

注：相同植被层的不同小写字母表示年降水量梯度间差异显著($P<0.05$)，图中数据为平均值±标准误差。

披针叶苔草为绝对优势种，其重要值为27.64；年降水量为530 mm时，披针叶苔草、披碱草（*Elymus dahuricus*）为优势种，其重要值之和为26.95。灌、草种沿年降水量梯度的变化，体现了其对水分的适应，表明了年降水量变化显著影响了群落的物种组成和优势度。

2.2 年降水量梯度下祁连圆柏种群的年龄结构

不同年降水量下祁连圆柏种群年龄结构变化明显（图2），年降水量为169 mm时，林下无幼苗，幼树和小树仅占个体总数的18.31%，大树占祁连圆柏个体总数的54.93%。年降水量为281 mm时，幼苗、幼树仅占祁连圆柏个体总数的4.25%，大树占祁连圆柏个体总数的55.93%。在年降水量为169~281 mm的区域，种群年龄结构为衰退型；在年降水量为377 mm时，中、大树占祁连圆柏个体总数的83.73%，种群已进入老龄化阶段，种群结构失衡；年降水量为470 mm时，小、中树占祁连圆柏个体总数的54.23%，大树占祁连圆柏个体总数的32.47%。年降水量为530 mm时，种群中幼苗、幼树和小树分别占祁连圆柏个体总数的13.29%、56.57%，大树仅占祁连圆柏个体总数的12.85%，种群年龄结构在年降水量>470 mm的区域为增长型。



注：相同植被层的不同小写字母表示年降水量梯度间差异显著（$P<0.05$），图中数据为平均值±标准误差。下同。

图2 不同年降水量梯度下祁连圆柏种群年龄结构

Fig. 2 Age structure of *Juniperus przewalskii* population in different annual precipitation

2.3 年降水量梯度下的林下植物*α*多样性特征

在各年降水量下祁连圆柏群落物种丰富度、Shannon-Wiener指数、Simpson指数均表现为草本层大于灌木层（图3）。随年降水量增加，物种丰富度

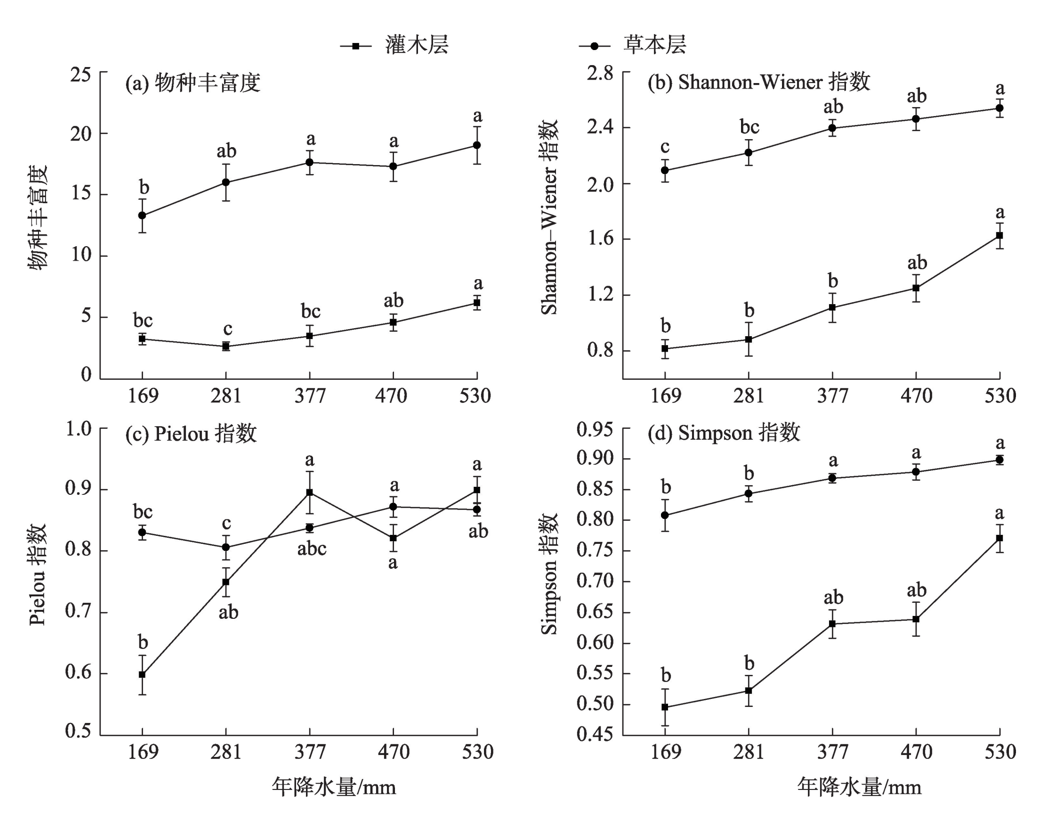


图3 *α*多样性指数沿年降水量梯度变化格局

Fig. 3 The *α* diversity index along annual precipitation gradients

呈波动变化,灌木层物种丰富度在年降水量为281 mm时达到最小值2.67,草本层物种丰富度在年降水量为169 mm时达到最小值13.27(图3a);Shannon-Wiener指数、Simpson指数随年降水量逐渐增加,年降水量为530 mm时,Shannon-Wiener指数(图3b)、Simpson指数(图3d)、物种丰富度均达到最大值,分别为灌木层(1.62、0.77、6.2)、草本层(2.54、0.90、19),均显著大于年降水量为281 mm、169 mm;年降水量为470 mm时,草本层的Pielou指数显著升高,达到最大值0.87,年降水量为377 mm和530 mm时,灌木层的Pielou指数大于草本层,分别为0.89、0.90(图3c)。由此可见,α多样性指数总体上随着年均降水量的增加呈逐渐增高的趋势。

2.4 年降水量梯度下的林下植物β多样性特征

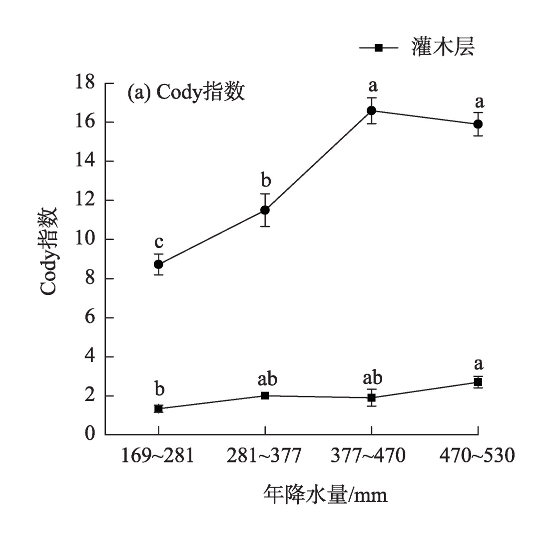
不同年降水量梯度下Cody指数均表现为灌木层<草本层(图4a),Sorensen指数均表现为灌木层>草本层(图4b),说明草本层的物种组成相似性小于灌木层,物种更替速率更快。在年降水量为281~377 mm、470~530 mm之间,灌木层的Cody指数出现最大值,分别为2.0、2.7(图4a),Sorensen相似系数出现最小值,分别为0.39、0.45(图4b),说明在年降水量在281~377 mm、470~530 mm之间,灌木层的物种更替速率最快,物种组成相似性最低;草本层的Cody指数随着年降水量的增加先升高后降低,在年降水量为377~470 mm之间时,Cody指数最大,为16.6(图4a),Sorensen相似系数与Cody指数随年降水量的变化趋势大致相反,在年降水量为377~470 mm之间时出现最小值,为0.15(图4b)。可见随着年均降水量增加,草本层的物种更替速率先加快、后降低。

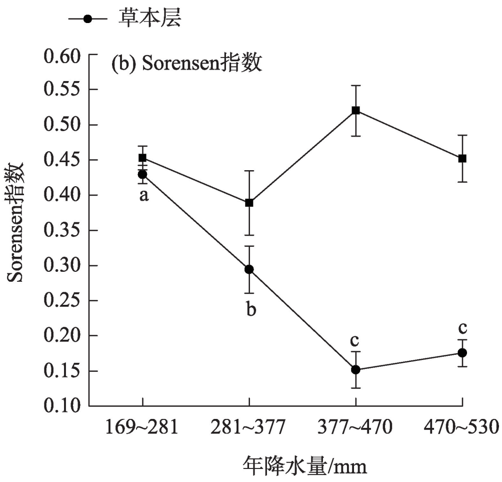
对年降水量梯度上祁连圆柏群落的α多样性指数和β多样性指数进行单因素方差分析,结果显示,除灌木层的Sorensen指数外,其他指数都在降水梯度上具有显著性差异,其中灌木层的Shannon-Wiener指数和物种丰富度S、草本层的Shannon-Wiener指数、Cody指数和Sorensen指数达到了极显著差异(表3),说明随着年降水量的改变,祁连圆柏群落物种多样性发生了明显变化。

3 讨 论

3.1 年降水量梯度对祁连圆柏群落物种组成的影响

本研究中祁连圆柏群落植物共36科102属144种,菊科、毛茛科、蔷薇科和唇形科占优势,与三江源区祁连圆柏天然群落组成相似[13],植物种以旱生灌木和多年生草本植物为主,这与研究区日照时间长、辐射强、降水量稀少、蒸发剧烈有关。水分是制约旱区植物生存与发育的主要限制因子,而降水是该地区获得水分的主要途径,降水量的变化在不同程度的影响着植物的生长,改变植物群落的组成[18-19]。本研究中,植物的重要值随年降水量梯度变化效应明显,同一物种的重要值在不同年降水量梯度之间差异较大,这与植物的生物学特性有关,如随年降水量梯度的增加,金露梅的重要值逐渐减小,物种的





注:相同植被层的不同小写字母表示年降水量梯度间差异显著($P<0.05$),图中数据为平均值±标准误差。

图4 β多样性指数沿年降水量梯度变化格局

Fig. 4 The β diversity index along annual precipitation gradients

表3 年降水量梯度下物种多样性指数方差分析

Tab. 3 Tests of species diversity index for annual precipitation gradients

植被层	自变量	平方和	自由度DF	均方MS	F	P
灌木层	H'	2.059	4	0.515	4.995	0.006**
	D	0.233	4	0.058	3.363	0.031*
	J_{sw}	0.265	4	0.066	4.06	0.015*
	S	39.875	4	9.969	6.093	0.002**
	Cody	6.091	3	2.03	4.568	0.015*
	Sorensen	0.034	3	0.011	0.484	0.697
草本层	H'	1.163	4	0.291	5.378	0.002**
	D	0.043	4	0.011	3.614	0.015*
	J_{sw}	0.022	4	0.005	3.039	0.031*
	S	163.805	4	40.951	2.727	0.046*
	Cody	275.201	3	91.734	36.362	0.000**
	Sorensen	0.335	3	0.112	18.283	0.000**

注:**表示差异极显著($P<0.01$);*表示差异显著($P<0.05$)。

优势度降低,这是因为金露梅在干旱环境下体内的渗透调节物质和抗氧化酶活性增加,能够对干旱胁迫做出积极的反馈[20],当年降水量最低时,金露梅为灌木层的绝对优势种。草本层中披碱草的重要值逐渐升高,这可能是因为多年生草本植物的根系主要分布在土壤表层,对表层土壤水分有较高的利用效率[21-22],而披针叶苔草的重要值随着年降水量梯度变化不明显,这是因为披针叶苔草的根、茎粗壮发达,生活力强,生态适应幅较广。但干珠扎布等[23]研究发现水分增加显著提高了藏北高寒草地各类植物的重要值,出现这种结果可能是因为藏北高寒地区年均降水量约为500 mm,相比于本研究区较为丰富,植物受到的水分胁迫更小。

3.2 年降水量梯度对祁连圆柏种群年龄结构的影响

种群的年龄结构反映了种群与周围环境之间的相互关系。本研究中,祁连圆柏种群的年龄结构随年降水量梯度而异,在年降水量在281~377 mm时,种群年龄结构为衰退型,表明幼苗存活率较低,出现这种结果的可能原因:一方面在于年降水量小蒸发量大的地区,幼苗对土壤水分的需求变得更强烈[24];另一方面,调查中发现林内出现了大量牲畜粪便,林内放牧对幼苗、幼树的践踏、啃食严重影响了天然更新。本研究中,年降水量>470 mm时,种群自然更新良好,处于稳定增长状态,而田晓萍等[14]研究发现祁连山北坡(年均降水量600 mm)祁连圆柏种群的年龄结构属衰退型,与本研究结果不同,其原因可能是本研究中祁连圆柏林分布海拔高,受人为干扰较小。

3.3 年降水量梯度对群落物种多样性指数的影响

本研究中,Shannon-Wiener指数、Simpson指数、物种丰富度均表现为灌木层小于草本层,可能是因为灌木对降水变化响应的敏感性较差[25],灌木叶片一般具有较高的氮含量,促进了脯氨酸的形成,抗旱性较强[26]。本研究中物种丰富度与Simpson指数变化趋势相似,可能是因为各样地中旱生灌木和多年生草本植物占据绝对优势,而其他物种数量偏少,导致群落的物种丰富度高,Simpson优势度指数也较高。张志南等[27]研究发现随着水分的增加,群落中的优势种地位上升,种间竞争抑制了其他物种的生存发育,导致群落均匀度较低,但本研究中Pielou均匀度指数随着年降水量的增加总体上升高,可能与植物的生态类型及人为干扰强度不同有关。本研究中,降水变化显著影响了祁连圆柏群落的物种多样性,而李长斌等[5]研究发现降水变化对群落物种多样性无显著影响,可能是因为其试验中降水的变异较小,加之生态系统具有弹性,能够抵抗短期内降水变化对群落物种多样性的影响。β多样性反映了环境梯度下不同生境群落之间物种组成的差异性,生境差异越大,β多样性越高[28]。本研究中,在年降水量梯度上,β多样性指数表现为灌木层<草本层,表明草本更替速率更快,灌木随年降水量增加较少消失或定居,而草本则会出现较多的伴生种。本研究发现年降水量梯度对Cody指数有

显著影响，而对Sorensen指数影响不显著，这是因为Cody指数与Sorensen指数的灵敏度有差异[29]。草本层的β多样性指数随年降水量梯度的增加先升高后降低，这主要是因为在年降水量169~470 mm，群落中逐渐出现了稀有种，如管花秦艽（*Gentiana siphonantha*）、鳞叶龙胆（*Gentiana squarrosa*）、青海野青茅（*Deyeuxia kokonorica*）、蛛毛蟹甲草（*Parasenecio roborowskii*）等，群落间的共有种减少，β多样性升高；而在年降水量470~530 mm之间，群落中的常见种和稀有种逐渐消失，如达乌里秦艽（*Gentiana dahurica*）、高原毛茛（*Ranunculus tanguticus*）、西北沼委陵菜（*Comarum salesovianum*）等，群落间的共有种增多，β多样性降低。

4 结 论

年降水量显著影响着祁连圆柏种群年龄结构、群落物种组成和多样性。年降水量为169~377 mm、470 mm和530 mm时，种群年龄结构分别为衰退型、稳定型和增长型。随着年降水量增加，灌草层的物种丰富度、多样性和优势度均呈增加趋势，灌木层的物种更替速率先加快、再减慢，最后升至最高点，草本层的物种更替速率先加快、后降低。为了促进祁连圆柏群落的健康与稳定，在年降水量169~377 mm林区宜进行微地形改造，增加地面粗糙度，改善林地土壤的水分状况，促进林分天然更新，同时应加大管护力度，对祁连圆柏群落采取封育措施，减少牲畜的践踏、采食及排泄等干扰，实现群落进展演替。

参考文献（References）：

[1] Lieth H, Whittaker R H. Modeling the primary productivity of the world[J]. Springer Berlin Heidelberg, 1975, 12(3): 237–263.

[2] 孙一梅, 田青, 吕朋, 等. 极端干旱与氮添加对半干旱沙质草地物种多样性、叶性状和生产力的影响[J]. 干旱区研究, 2020, 37(6): 1569–1579. [Sun Yimei, Tian Qing, Lyu Peng, et al. Effects of extreme drought and nitrogen addition on species diversity, leaf trait, and productivity in a semiarid sandy grassland[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(6): 1569–1579.]

[3] 秦洁, 司建华, 贾冰, 等. 巴丹吉林沙漠植被群落特征与土壤水分关系研究[J]. 干旱区研究, 2021, 38(1): 207–222. [Qin Jie, Si Jianhua, Jia Bing, et al. Study on the relationship between vegetation community characteristics and soil moisture in Badain Jaran Desert[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(1): 207–222.]

[4] 孙岩, 何明珠, 王立. 降水控制对荒漠植物群落物种多样性和生物量的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(7): 2425–2433. [Sun Yan, He Mingzhu, Wang Li. Effects of precipitation control on plant diversity and biomass in a desert region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(7): 2425–2433.]

[5] 李长斌, 彭云峰, 赵殿智, 等. 降水变化和氮素添加对青藏高原高寒草原群落结构和物种多样性的影响[J]. 水土保持研究, 2016, 23(6): 185–191. [Li Changbin, Peng Yunfeng, Zhao Dianzhi, et al. Effects of precipitation change and nitrogen addition on community structure and plant diversity in an alpine steppe on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(6): 185–191.]

[6] 武建双, 李晓佳, 沈振西, 等. 藏北高寒草地样带物种多样性沿降水梯度的分布格局[J]. 草业学报, 2012, 21(3): 17–25. [Wu Jianshuang, Li Xiaojia, Shen Zhenxi, et al. Distribution pattern of species diversity along precipitation gradient in alpine grassland transect in northern Tibet[J]. Acta Pratacul Turae Sinica, 2012, 21(3): 17–25.]

[7] Zelnik I, Arni A. Plant species diversity and composition of wet grasslands in relation to environmental factors[J]. Biodiversity and Conservation, 2013, 22(10): 2179–2192.

[8] 姚俊强, 杨青, 刘志辉, 等. 中国西北干旱区降水时空分布特征[J]. 生态学报, 2015, 35(17): 5846–5855. [Yao Junqiang, Yang Qing, Liu Zhihui, et al. Spatio-temporal change of precipitation in arid region of the northwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(17): 5846–5855.]

[9] 金敏艳, 李进军, 车宗玺, 等. 祁连山中部祁连圆柏年内径向生长对气候因子的响应[J]. 生态学报, 2020, 40(21): 7699–7708. [Jin Minyan, Li Jinjun, Che Zongxi, et al. Intra-annual radial growth responses of Qilian juniper (*Juniperus przewalskii*) to climate factors in the central Qilian Mountains, northwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(21): 7699–7708.]

[10] 崔英, 王占林, 张得芳, 等. 土壤含水量和光照对祁连圆柏光合生理指标的影响[J]. 西部林业科学, 2019, 48(5): 95–100. [Cui Ying, Wang Zhanlin, Zhang Defang, et al. Effects of soil water content and light on physiological indexes of *Juniperus przewalskii* kom.[J]. Journal of West China Forestry Science, 2019, 48(5): 95–100.]

[11] 吕鸿光. 祁连圆柏抗旱造林技术[J]. 农业工程, 2019, 9(1): 98–100. [Lyu Hongguang. Qilian Sabina drought-resistance afforestation technology[J]. Agricultural Engineering, 2019, 9(1): 98–100.]

[12] 施征, 白登忠, 雷静品, 等. 祁连圆柏光合色素与非结构性碳水化合物含量对海拔变化的响应[J]. 西北植物学报, 2012, 32(11): 2286–2292. [Shi Zheng, Bai Dengzhong, Lei Jingpin, et al. Variations of chloroplast pigments and non-structural carbohydrates of *Sabina przewalshii* along altitude in Qilian Mountains timberline[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2012, 32(11): 2286–2292.]

[13] 张静, 陈志林, 侯晓巍, 等. 三江源区祁连圆柏群落物种多样性沿海拔梯度的变化格局[J]. 西北植物学报, 2020, 40(10): 1759–

1767. [Zhang Jing, Hou Zhilin, Hou Xiaowei, et al. Species diversity of *Juniperus przewalskii* community in Three River Headwater along altitude gradien[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2020, 40(10): 1759−1767.]

[14] 田晓萍, 马力, 占玉芳. 祁连山北坡中段祁连圆柏群落学特征的研究[J]. 西北林学院学报, 2015, 30(2): 77−83. [Tian Xiaoping, Ma Li, Zhan Yufang. Community characteristics of *Sabina przewalshii* in northern slope of Qilian Mountains[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(2): 77−83.]

[15] 康迪, 郭垚鑫, 杜焰玲, 等. 小陇山人工油松林径级结构及林下植物多样性研究[J]. 西北林学院学报, 2012, 27(4): 54−59. [Kang Di, Guo Yaoxin, Du Yanling, et al. Diameter-class structure and understory diversity of *Pinus tabulaeformis* plantations in Xiaolong Mountain[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(4): 54−59.]

[16] 方精云, 王襄平, 沈泽昊, 等. 植物群落清查的主要内容、方法和技术规范[J]. 生物多样性, 2009, 17(6): 533−548. [Fang Jingyun, Wang Xiangping, Shen Zehao, et al. Methods and protocols for plant community inventory[J]. Biodiversity Science, 2009, 17(6): 533−548.]

[17] 张晓龙, 周继华, 蔡文涛, 等. 水分梯度下黑河流域荒漠植物群落多样性特征[J]. 生态学报, 2017, 37(14): 4627−4635. [Zhang Xiaolong, Zhou Jihua, Cai Wentao, et al. Diversity characteristics of plant communities in the arid desert of the Heihe basin under different moisture gradients[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(14): 4627−4635.]

[18] Knapp A K, Ciais P, Smith M D. Reconciling inconsistencies in precipitation-productivity relationships: implications for climate change[J]. New Phytologis, 2017, 214(1): 41−47.

[19] 胡亚, 郭新新, 岳平, 等. 水分和养分添加对内蒙古荒漠草原沙生针茅生长与生理特性及其敏感性的影响[J]. 干旱区研究, 2021, 38(2): 487−493. [Hu Ya, Guo Xinxin, Yue Ping, et al. Effects of water and nutrient addition on the growth and physiology of *Stipa glareosa* in a desert steppe in Inner Mongolia[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(2): 487−493.]

[20] 丁龙, 赵慧敏, 曾文静, 等. 五种西北旱区植物对干旱胁迫的生理响应[J]. 应用生态学报, 2017, 28(5): 1455−1463. [Ding Long, Zhao Huimin, Zeng Wenjing, et al. Physiological responses of five plants in northwest China arid area under drought stress[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(5): 1455−1463.]

[21] Schenk H J, Jackson R B. Rooting depths, lateral root spreads and below-ground/above-ground allometries of plants in water-limited ecosystems[J]. Journal of Ecology, 2010, 90(6): 480−490.

[22] Jackson R B. Belowground consequences of vegetation change and their treatment in models[J]. Ecological Applications, 2000, 10(2): 470−483.

[23] 干珠扎布, 段敏杰, 郭亚奇, 等. 喷灌对藏北高寒草地生产力和物种多样性的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(22): 7485−7493. [H Ganjurjav, Duan Minjie, Guo Yaqi, et al. Effects of irrigation on alpine grassland Northern Tibet[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(22): 7485−7493.]

[24] Liu H L, Shi X, Wang J C, et al. Effects of sand burial, soil water content and distribution pattern of seeds in sand on seed germination and seedling survival of *Eremosparton songoricum* (Fabaceae), a rare species inhabiting the moving sand dunes of the Gurbantunggut Desert of China[J]. Plant and Soil, 2011, 345(1−2): 69−87.

[25] Ehleringer S. Water use trade-offs and optimal adaptations to pulse-driven arid ecosystems[J]. Journal of Ecology, 2001, 89(3): 464−480.

[26] Yuan Z Y, Chen H. Global trends in senesced-leaf nitrogen and phosphorus[J]. Global Ecology and Biogeography, 2010, 18(5): 532−542.

[27] 张志南, 武高林, 王冬, 等. 黄土高原半干旱区天然草地群落结构与土壤水分关系[J]. 草业学报, 2014, 23(6): 313−319. [Zhang Zhinan, Wu Gaolin, Wang Dong, et al. Plant community structure and soil moisture in the semi-arid natural grassland of the Loess Plateau[J]. Acta Pratacul Turae Sinica, 2014, 23(6): 313−319.]

[28] 王乐, 赵利清, 陈育, 等. 西鄂尔多斯草原化荒漠植物群落多样性[J]. 干旱区研究, 2015, 32(2): 258−265. [Wang Le, Zhao Liqing, Chen Yu, et al. Plant community diversity of steppification desert in West Ordos[J]. Arid Zone Research, 2015, 32(2): 258−265.]

[29] Jankowski J E, Ciecka A L, Rabenold M. Beta diversity along environmental gradients: Implications of habitat specialization in tropical montane landscapes[J]. Journal of Animal Ecology, 2009, 78(2): 315−327.

Community characteristics of *Juniperus przewalskii* along annual precipitation gradients

WANG Tongben[1], ZHU Qin[1], HOU Xiaowei[2], HAO Jiatian[2], LI Zhihua[2], HOU Lin[1,3]

(1. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; 2. Northwest Institute of Forest Inventory, Planning and Design, State Forest and Grassland Administration, Xi'an 710048, Shaanxi, China; 3. Qinling National Forest Ecosystem Research Station, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: Precipitation is the most important factor restricting the structure and species diversity of plant communities in arid and semiarid areas. In recent years, the variation patterns of community species diversity along environmental gradients have become one of the research hotspots in ecology. However, many controversies about the response of plant community characteristics to changes in natural precipitation remain unresolved. In the arid area of Qinghai province, one of the dominant tree species is *Juniperus przewalskii*, which plays a key role in water and soil conservation, water holding, and ecological balance. Studying the changes in age structure, community composition, and species diversity of *J. przewalskii* population along the annual precipitation gradient is important for the conservation of natural plant communities in arid areas. This study was conducted to understand the response of the community characteristics of *J. przewalskii* and the age structure of its population to annual precipitation gradient. The natural community of *J. przewalskii* in Qinghai province was taken as the research object, and a community sample plot was laid out along the annual precipitation gradient. The community characteristics of this species were also investigated. Results showed that (1) annual precipitation increased gradually from northwest to southeast in this area. As annual precipitation increased, the importance of dominant species in the shrub and herb layers of *J. przewalskii* communities changed significantly (P<0.05). (2) When the annual precipitation was between 169 and 377 mm, the population decreased. Conversely, the population remained stable at annual precipitation of 470 mm, but it increased at annual precipitation of 530 mm. (3) The α diversity index of understory plants was significantly different under various annual precipitation levels (P<0.05). As annual precipitation increased, the Shannon-Wiener index, Simpson index, and species richness of shrub and herb layers increased gradually and reached the maximum values when the annual precipitation was 530 mm. (4) As annual precipitation increased, the β diversity index of the shrub layer fluctuated. Cody and Sorensen indices peaked and reached a trough value when the annual precipitation levels were 470–530 and 281–377 mm, respectively. The β diversity index of the herb layer increased first and then decreased. The Cody and Sorensen indices peaked and reached the trough value when the annual precipitation ranged from 377 mm to 470 mm. The maximum β diversity and the fastest rate of species replacement were observed in this gradient. Annual precipitation significantly affected the age structure and community characteristics of *J. przewalskii* population. In a forest area with annual precipitation of less than 377 mm, the following measures should be implemented to promote the health and stability of communities: the microtopography of the forest should be transformed, surface roughness should be increased, natural precipitation should be collected, and management and protection should be strengthened to prevent injury to cattle and sheep and thus facilitate natural regeneration.

Keywords: annual precipitation gradient; *Juniperus przewalskii*; community characteristics; species diversity; Qinghai